doi:10.13866/j.azr.2019.06.16

近 30 a 河东地区极端气温时空变化①

焦文慧[1]， 张 勃[1]， 黄 涛[2]， 马尚谦[1]， 侯 启[1]
（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；2. 西北区域气候中心，甘肃 兰州 730020）

摘 要： 利用 61 个气象站 1988—2017 年逐日最高气温、最低气温和平均气温资料，采用线性倾向估计、Mann-Kendal 检验、滑动 t 以及相关分析方法，对河东地区极端气温事件的时空变化特征进行研究，结果表明：①河东地区近 30 a 日最高气温的极大（小）值、日最低气温的极大（小）值、年平均最高（低）气温、夏日日数、热夜日数、暖昼（夜）日数、气温日较差、暖日持续日数、生物生长季呈现增大（加）趋势，霜冻日数、冰冻日数、冷昼（夜）日数、冷日持续日数呈现减小（少）趋势；②暖指数的变暖幅度大于冷指数，昼指数的变暖幅度大于夜指数，陇东高原地区变暖幅度最大，甘南高原地区变暖幅度最小；③多数指数的突变点在 20 世纪 90 年代中后期和 21 世纪初期；④多数极端气温指数与经度和海拔高度显著相关，河东地区极端气温指数的变化与区域性增暖有密切联系。

关键词： 极端气温；冷（暖）指数；时空变化；河东地区；甘肃

20 世纪以来，由于全球气候变暖，气候变化问题越来越受公众瞩目。IPCC 第五次评估报告指出，2003—2012 年平均温度比 1850—1900 年上升了 0.78 ℃[1]，其中以北方地区和青藏高原最为显著[2-3]。由于平均温度的升高，预计极端温度事件的频率和强度将急剧增加，这会对环境、社会经济系统、人类活动造成严重的负面影响[4-6]。极端温度作为一种极端气候事件，近年来各国气象学者已从不同的角度对其作了研究，发现在全球范围内[7]，大部分地区冷夜明显减少，暖夜明显增加。Rahimzadeh 等[8]对伊朗 1950—2003 年极端气候研究中发现，在大部分地区霜冻日数、冷昼（夜）等指数呈明显的负趋势，而夏日日数、暖昼和热夜出现了正趋势。Supari 等[9]对印度尼西亚过去 30 a 的极端气候研究中发现，冷昼（夜）减少，暖昼（夜）增多，呈现出明显的变暖趋势。Caesar 等[10]对整个印度—太平洋地区研究表明，该区极端气候变化趋势与全球具有一致性，且其冷夜等极端冷指数的变化幅度比全球尺度的变化更大。许多学者从中国流域[11-13]、地理分区[14-15]以及较大的山脉[16]等尺度分析极端气温事件的变化。Zhou 等[17]的研究表明，1961—2008 年中国大陆地区霜冻日数和结冰日数明显减少、冷夜（昼）日数普遍减少、暖夜（昼）日数明显增加。任福民等[18]和 Zhai 等[19]比较系统地分析了中国区域极端温度时空变化，指出了中国区域极端事件的季节特征和区域差异。齐月等[20]对西北地区 1961—2010 年极端气候变化研究得出，气温整体呈增加趋势，极端高温事件增多，极端低温事件减少。汪宝龙等[15]认为，近 50 a 来中国西北地区严寒天气和极端低温事件明显减少，极端暖指标呈明显上升趋势，表现为气温变暖趋势与全球变暖一致，还发现甘肃省极端气温呈现持续增长的趋势，并存在显著的空间差异[21]。

河东地区为重要的雨养农业区，是气候变化的敏感区，也是生态环境的脆弱区[22]。近年来很多学者对河东地区气候变化以及气候变化对农业的影响进行了大量研究[23-25]，在气温变化研究中多侧重于平均状态，而针对极端气温的分析尚不多见，有必要对河东地区极端气温事件变化特征及其演变规律进行深入分析，为减轻极端气温事件对当地生产生活造成的不利影响和保障农业生产安全提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃黄河以东地区（100.73° ~ 108.73° E、

① **收稿日期：** 2019-01-07； **修订日期：** 2019-03-07
基金项目： 国家自然科学基金项目（41561024）资助
作者简介： 焦文慧（1995-），女，硕士，主要从事区域环境与资源开发研究. E-mail：jiaowenhuixlt@163.com
通讯作者： 张勃. E-mail：zhangbo@nwnu.edu.cn

32.52°～37.30°N),简称为河东地区,处于东部季风区、西北干旱区、青藏高寒区三大自然区的交汇带。在行政区划上包括陇南市、庆阳市、平凉市、定西市、天水市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州、白银市和兰州市。该区地形复杂,地势大致从西北向东南降低,由甘南高原、陇南山地、中部的黄土高原和丘陵地貌(陇西高原和陇东高原)组成,河东地区气象站点分布见图 1。

1.2 数据来源和极端指数

1.2.1 *数据来源* 为尽可能保证所选站点数据资料的连续性、统一性和时间一致性,本研究选择了河东地区 1988—2017 年 61 个气象站点的逐日最高气温、最低气温和平均气温资料,数据来源于甘肃省气象局西北区域气候中心。

1.2.2 *极端指数定义及其分类* 对极端气温指数的定义和计算采用的世界气象组织(WMO)气候委员会与 CLIVAR 计划联合设立的气候变化检测、监测和指标专家组(ETCCDMI)确定的气候变化指数[12],选取 27 种指数中的 16 种极端气温指数以及年平均气温最高值和年平均气温最低值,共 18 个极端气温指数(表 1)。将极端气温指数分为绝对指数、相对指数、极值指数和其他指数 4 种类型[12,26-27]。所有气温指数在经过严格的质量控制后均在 R 语言的 RClimDex 1.0 中完成计算。

1.3 研究方法

采用最小二乘法对极端气温指数进行线性倾向估计[28],并用 Mann-Kendal 非参数检验方法(M-K 检验)[29-30]对极端气温指数的变化趋势进行显著性检验[31]。将 M-K 检验方法和滑动 t 检验法相结合进行指数的突变分析。利用 ArcGIS 10.2 软件的 IDW(inverse distance weighted)绘制河东地区气温指数变化趋势空间分布图。采用 Pearson 相关性分析方法[16],分析了极端气温指数与各地理位置参数的相关性。

2 结果与分析

2.1 极端气温的时间变化

图 2 为部分极端气温指数的变化趋势图,因本研究的指数较多,且各图形类似,故选取其中 9 个指数的时间变化趋势图和突变图,其余省略。表 2 为各极端气温指数 4 个时段的变化趋势。

由表 2 可知,近 30 a 绝对指数 FD0 与 ID0 以 $-5.40\ \mathrm{d\cdot(10a)^{-1}}$ 和 $-2.61\ \mathrm{d\cdot(10a)^{-1}}$ 的速率显著下降,SU25 和 TR20 分别以 $6.36\ \mathrm{d\cdot(10a)^{-1}}$ 和 $1.85\ \mathrm{d\cdot(10a)^{-1}}$ 的速率显著上升。相对指数 TX90P

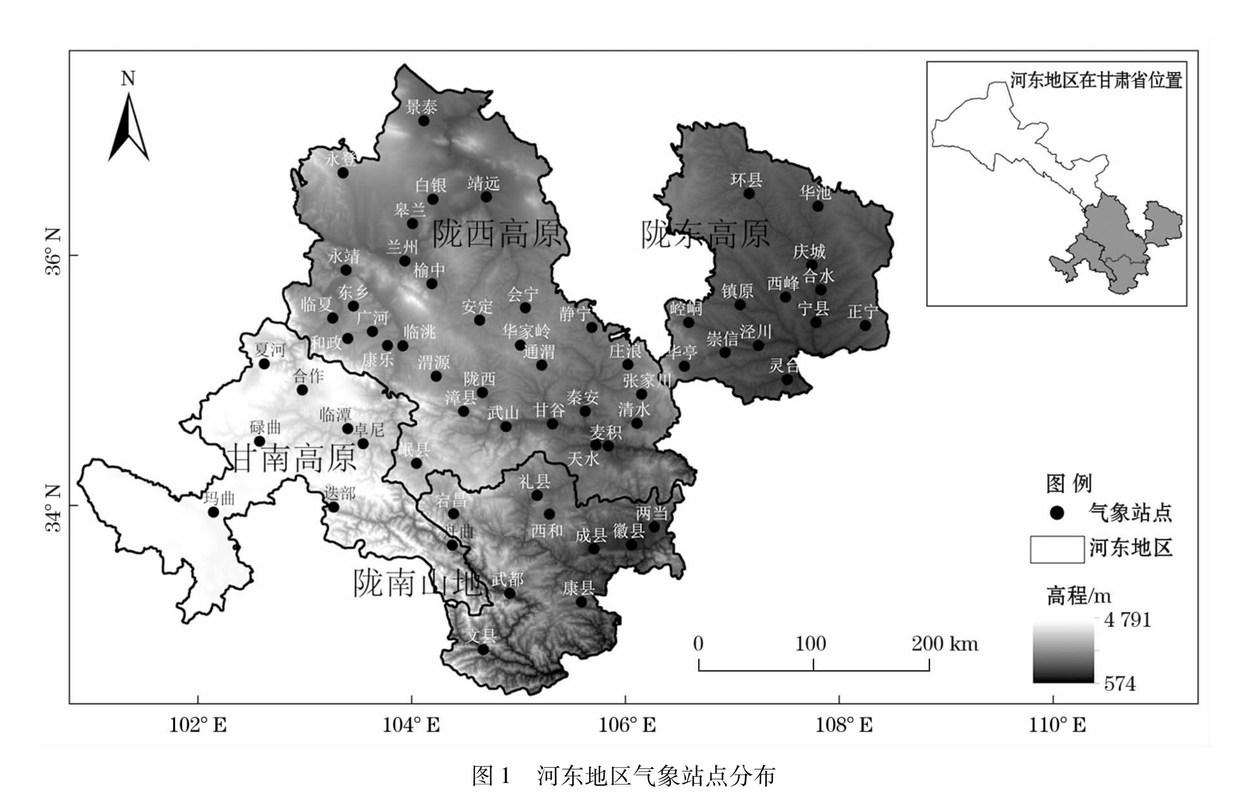


图 1 河东地区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Hedong region

表 1　极端气温指数定义

Tab. 1　The definitions of extreme air temperature indices

类别	符号	单位	极端气温指数	定义
绝对指数	FD0	d	霜冻日数	一年中日最低气温小于 0 ℃的天数
	ID0	d	冰冻日数	一年中日最高气温小于 0 ℃的天数
	SU25	d	夏日日数	年内日最高气温大于 25 ℃的日数
	TR20	d	热夜日数	年内日最低气温大于 20 ℃的日数
相对指数	TX90P	d	暖昼日数	日最高气温超过 90% 分位值的天数
	TN90P	d	暖夜日数	日最低气温超过 90% 分位值的天数
	TX10P	d	冷昼日数	日最高气温小于 10% 分位值的天数
	TN10P	d	冷夜日数	日最低气温小于 10% 分位值的天数
极值指数	TXx	℃	日最高气温极大值	年内日最高气温的极大值
	TNx	℃	日最低气温极大值	年内日最低气温的极大值
	TXn	℃	日最高气温极小值	每个月日最高气温的极小值
	TNn	℃	日最低气温极小值	每个月日最低气温的极小值
其他指数	TXam	℃	年平均最高气温	年内月最高气温的平均值
	TNam	℃	年平均最低气温	年内月最低气温的平均值
	DTR	℃	气温日较差	年内日最高气温与最低气温的差值
	GSL	d	作物生长季	日平均气温大于 5 ℃的日数
	CSDI	d	冷日持续日数	年内至少连续 6 d 日最低气温小于 10% 分位值的日数
	WSDI	d	暖日持续日数	年内至少连续 6 d 日最高气温大于 90% 分位值的日数

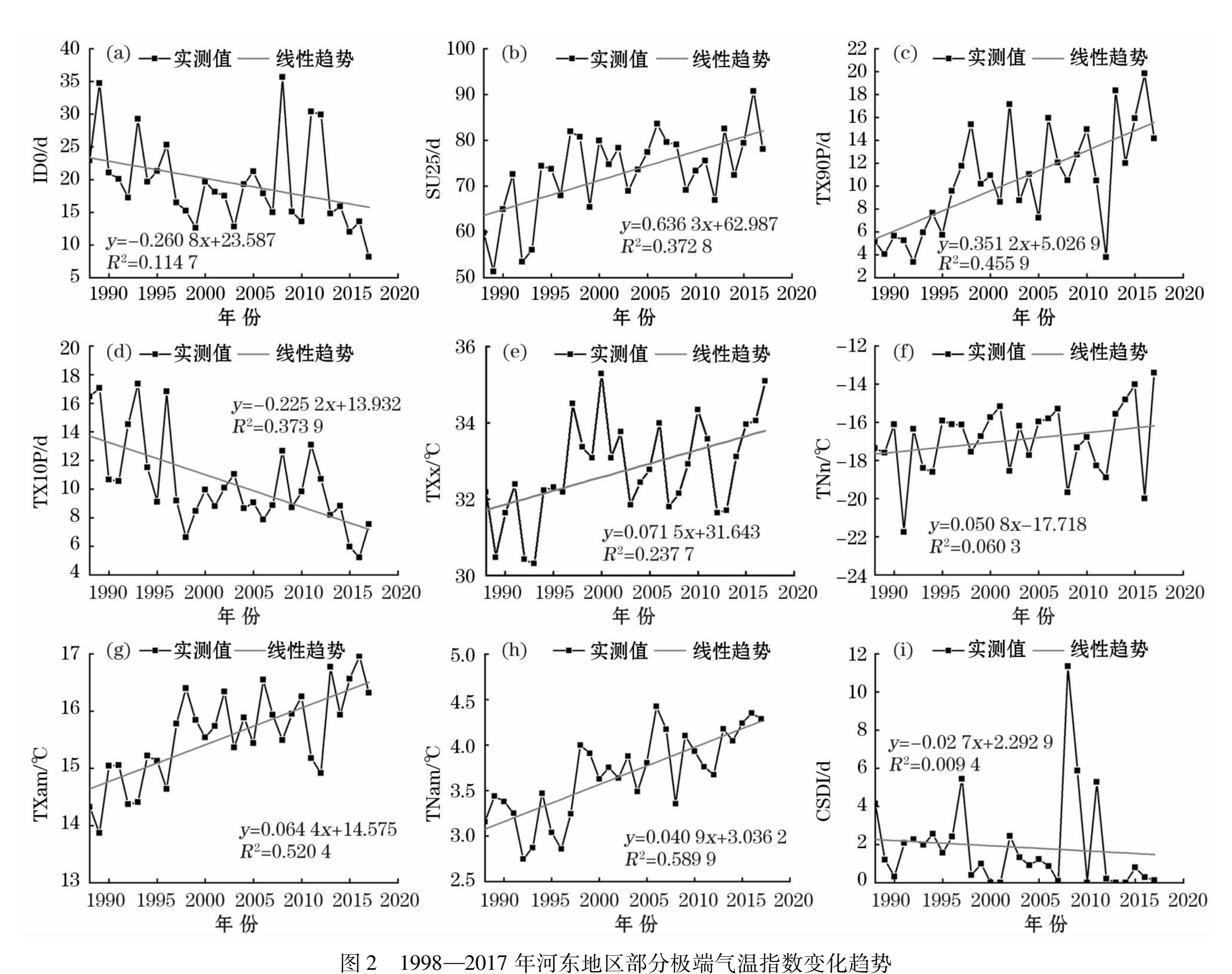


图 2　1998—2017 年河东地区部分极端气温指数变化趋势

Fig. 2　Trends of some extreme air temperature indices in the Hedong region from 1998 to 2017

表 2　极端气温指数的变化趋势

Tab. 2　The trends of extreme air temperature indices

指数	1988—1997 年	1998—2007 年	2008—2017 年	1988—2017 年	指数	1988—1997 年	1998—2007 年	2008—2017 年	1988—2017 年
FD0	-0.17	-3.80	-11.17	-5.40**	TNx	0.85	0.15	1.69	0.52**
ID0	-6.79	2.52	-19.67*	-2.61**	TXn	1.90	1.00	4.01	0.38
SU25	22.26*	5.55	10.83	6.36**	TNn	1.81	-0.71	3.97	0.51
TR20	2.68	3.62	4.31	1.85*	TXam	1.18*	-0.02	1.22	0.64**
TX90P	6.57*	-0.55	6.45	3.51**	TNam	-0.26	0.34	0.79*	0.41**
TN90P	1.20	3.55	3.54	3.09**	DTR	1.43*	-0.35	0.44	0.24*
TX10P	-4.19	0.72	-6.37*	-2.25**	GSL	-3.38	4.76	4.89	7.66**
TN10P	3.74	-0.20	-5.34*	-1.95**	CSDI	1.67	0.26	-9.21	-0.27*
TXx	2.16	-1.47	1.90	0.72*	WSDI	5.86	-3.86	7.89	1.95**

注:*、**分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性检验水平。变化趋势〔d·(10a) $^{-1}$ 或℃·(10a) $^{-1}$〕。

和 TN90P 呈显著增加趋势,年际倾向率分别为 3.51 d·(10a) $^{-1}$ 和 3.09 d·(10a) $^{-1}$,TX10P 和 TN10P 呈显著减少趋势,年际倾向率分别为 -2.25 d·(10a) $^{-1}$ 和 -1.95 d·(10a) $^{-1}$,其中昼指数(TX90P、TX10P)变化幅度大于夜指数(TN90P、TN10P)。极值指数中只有 TXx 和 TNx 的上升趋势显著。其他指数中 TXam 和 TNam 表现为显著上升趋势,年际倾向率分别为 0.64 ℃·(10a) $^{-1}$ 和 0.41 ℃·(10a) $^{-1}$。GSL 和 WSDI 呈显著增加趋势,年际倾向率分别为 7.66 d·(10a) $^{-1}$ 和 1.95 d·(10a) $^{-1}$。CSDI 呈显著下降趋势,年际倾向率为 -0.27 d·(10a) $^{-1}$。近 10 a 来多数指数变化幅度较大。

各时段气温指数变化有所差异:1988—1997 年,TN10P、CSDI 呈增加趋势,TNam、GSL 呈减少趋势;1998—2007 年,ID0、TX10P、CSDI 呈增加趋势,TX90P、TXx、TXam、DTR、WSDI 呈减少趋势,变化都很微弱,但每个时段都呈变暖趋势。

近 30 a 河东地区呈明显的变暖趋势,极端气温指数中极端气温暖指数(SU25、TR20、TX90P、TN90P、TXx、TNx、GSL、WSDI)明显增加,极端气温冷指数(ID0、FD0、TX10P、TN10P、TNn、TXn、CSDI)除 TNn 和 TXn 外都明显减少,同时暖指数的增加幅度大于冷指数的减小幅度。

2.1.1　极端气温指数的突变分析　图 3 为部分极端气温指数的突变检验图,其余指数的突变年份见表 3。通过对各气温指数的突变分析得出,有 13 个极端气温指数有突变发生,多数极端气温指数的突变年份发生在 20 世纪中后期和 21 世纪初期。

从图 3a 可知,在 0.05 置信度区间内,*UF* 与 *UB* 曲线有多个交点,经过滑动 *t* 检验发现 ID0 在 1997 年发生突变。图 3b 显示,SU25 在 1997 年之后上升趋势显著,在 0.05 置信度下于 1994 年发生突变。TX90P 在 1995 年发生突变,1996 年之后上升趋势显著。在 0.05 置信度区间内,TX10P 在 1997 年发生突变。TXx 在 1999—2007 年上升趋势十分显著,*UF* 与 *UB* 曲线在置信度区间内有多个交点,通过滑动 *t* 检验发现,TXx 在 2005 年发生突变。而图 3f 中 *UF* 与 *UB* 曲线在 0.05 置信区间内有多个交点,但均没有通过滑动 *t* 检验,故 TNn 在研究时段内没有发生突变。TXam 和 TNam 分别在 1997 年和 2002 年之后上升趋势显著,分别在 1994 年和 2002 年发生突变。图 3i 显示 *UF* 与 *UB* 曲线在 0.05 置信区间内有多个交点,通过滑动 *t* 检验表明 CSDI 在 2000 年发生突变。在 0.05 置信度区间和滑动 *t* 检验下,FD0、TR20、TN10P、TNx、GSL 分别在 2003 年、1995 年、2001 年、1999 年、2001 年发生突变(表 3)。

2.2　空间变化

2.2.1　绝对指数　从图 4 看,空间尺度上,FD0 呈全区一致的减少趋势,大部分站点减少趋势显著,西部和中东部减少幅度较大〔-10.31 ~ -6.31 d·(10a) $^{-1}$〕,其中安定的减少幅度最大〔-10.21 d·(10a) $^{-1}$〕,并通过了 0.01 的显著性检验。除永靖和靖远 2 个站点呈微弱增加趋势外,ID0 均呈减少趋势,约 39.34% (24 个)的站点减少趋势显著,其中灵台的减少幅度最大〔-12.82 d·(10a) $^{-1}$〕,并通过了 0.01 的显著性检验。SU25 呈全区一致的增加趋势,大部分站点增加趋势显著,会宁、宁县和灵台的增幅较大,均超过 12 d·(10a) $^{-1}$。TR20 呈全区一致的增加趋势,约 29.51% (18 个)的站点增加趋势显著,南部增幅较大〔4.03 ~ 9.51 d·(10a) $^{-1}$〕,其中文县增幅最大〔9.51 d·(10a) $^{-1}$〕,

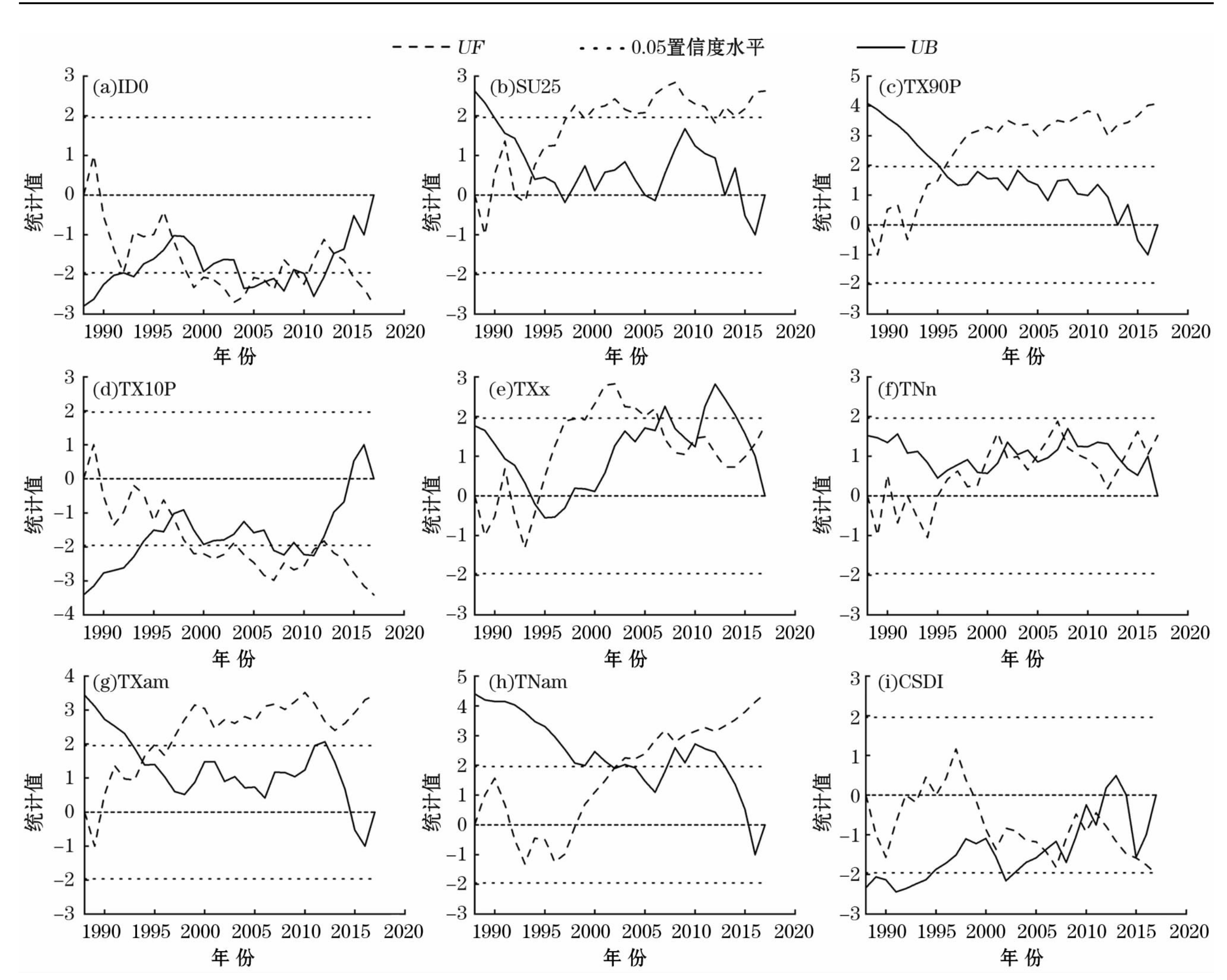


图 3 部分极端气温指数的 M-K 检验

Fig. 3 M-K test of some extreme air temperature indices

表 3 各极端气温指数突变年份

Tab. 3 Abrupt change years of extreme air temperature indices

极端气温指数	FD0	ID0	SU25	TR20	TX90P	TN90P	TX10P	TN10P	TXx
突变年份	2003	1997	1994	1995	1995	–	1997	2001	2005
极端气温指数	TNx	TXn	TNn	TXam	TNam	DTR	GSL	CSDI	WSDI
突变年份	1999	–	–	1994	2002	–	2001	2000	–

并通过 0.01 的显著性检验。

2.2.2 相对指数 由图 5 看，TX90P 呈全区一致的增加趋势，且所有站点增加趋势显著，灵台站增幅最大〔7.63 d・(10a)$^{-1}$〕。TN90P 呈全区一致的增加趋势，约 96.72%(59 个)的站点增加趋势显著，所有站点的 TX10P 均呈现出减少趋势，约 77.05%(47 个)的站点减少趋势显著，减少幅度最大的站点为灵台〔-8.23 d・(10a)$^{-1}$〕，且通过 0.01 的显著性检验。区域内 91.80%(56 个)的站点 TN10P 呈减少趋势，安定减幅最大〔-5.10 d・(10a)$^{-1}$〕，且通过 0.01 显著性检验，约 71.43%(40 个)的站点减少趋势明显，呈增加趋势的站点主要分布在东部地区。

2.2.3 极值指数 由图 6 得知，TXx 在空间上呈全区一致的增加趋势，约 59.02%(36 个)的站点增加趋势显著，灵台增幅最大〔2.21 ℃・(10a)$^{-1}$〕，并通过 0.01 显著性检验。除东部的正宁外，TNx 均呈增加趋势，约 51.67%(31 个)的站点增加趋势显著，其中碌曲增幅最大〔2.71 ℃・(10a)$^{-1}$〕，但变化不显著。大部分站点 TNn 呈增加趋势，增幅最大的站点为康乐站，超过 2.03 ℃・(10a)$^{-1}$，且通过

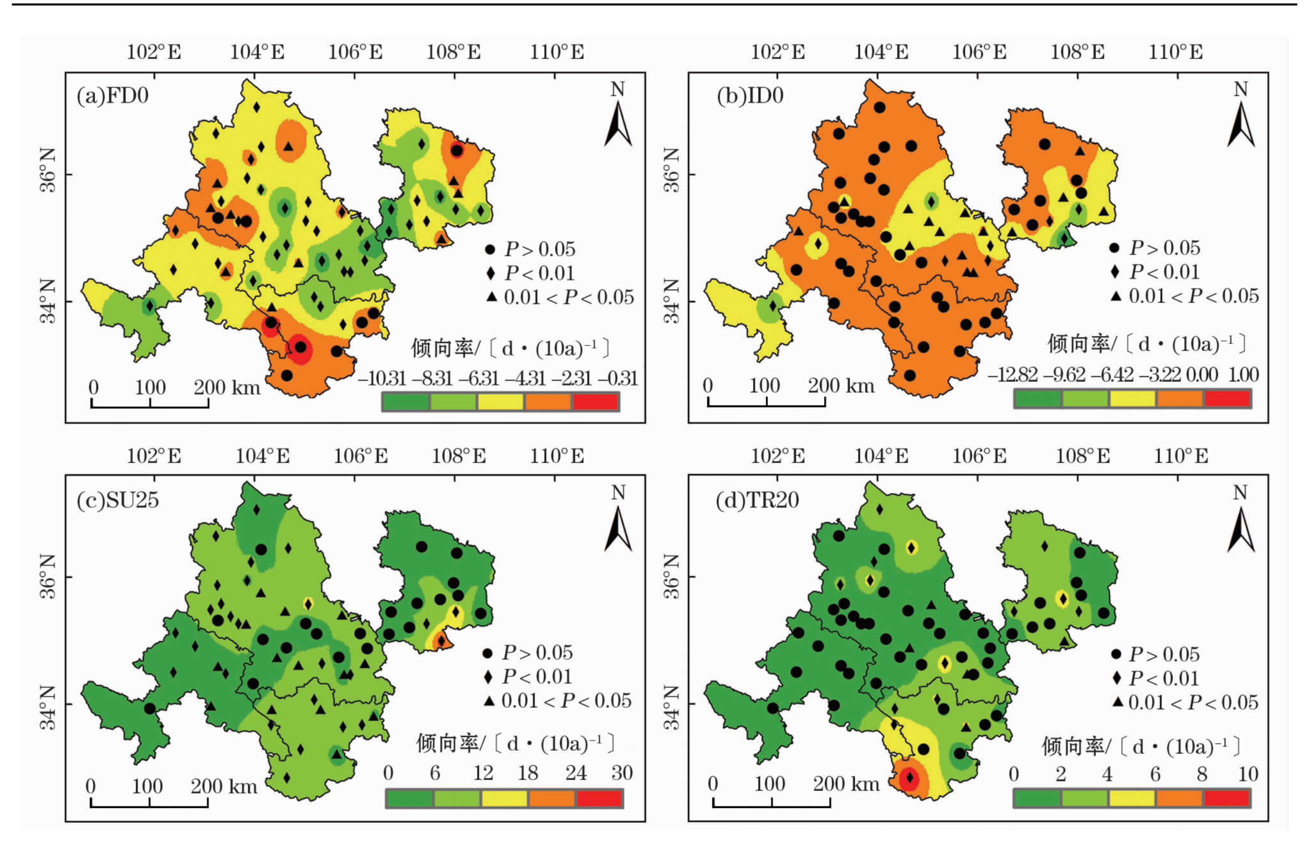


图 4　1988—2017 年河东地区极端气温绝对指数趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of absolute indices of extreme temperature events in the Hedong region from 1988 to 2017

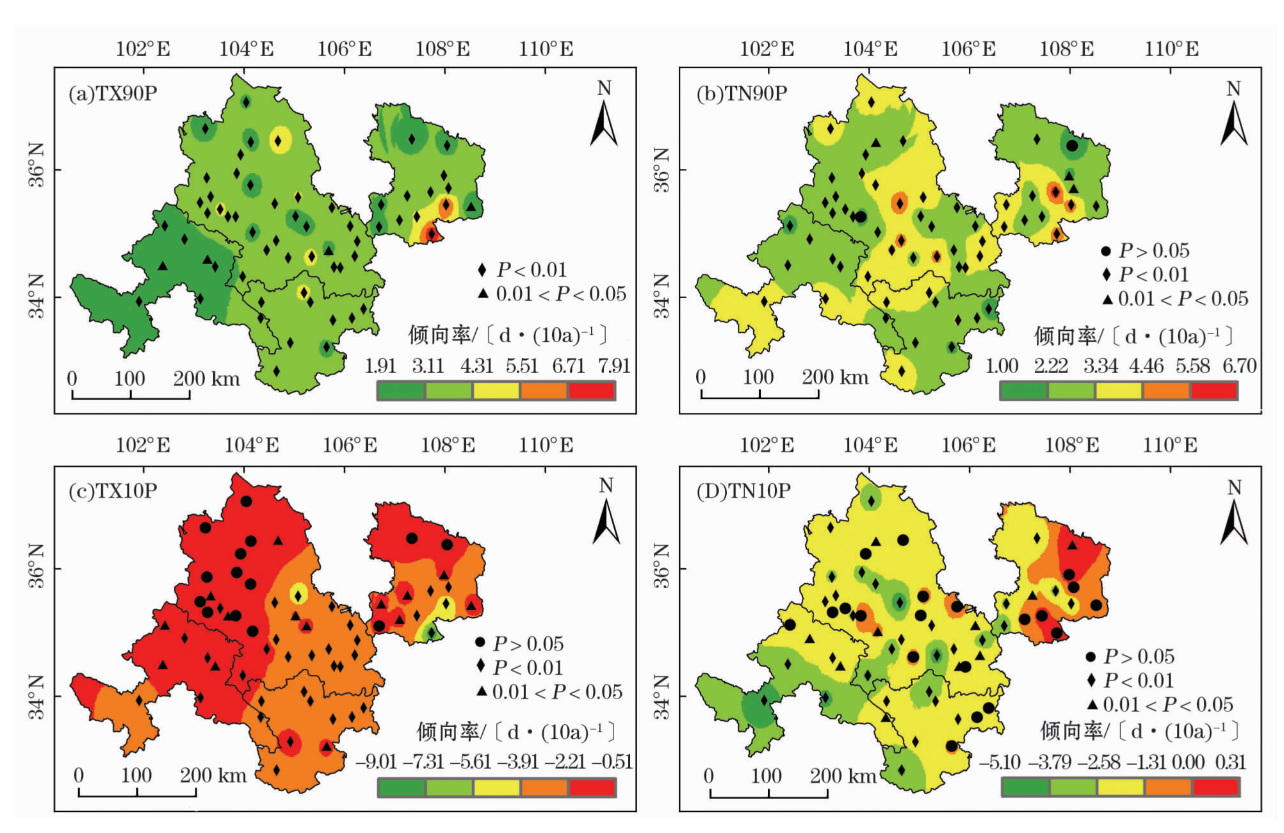


图 5　1988—2017 年河东地区极端气温相对指数趋势的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of relative indices of extreme temperature events in the Hedong region from 1988 to 2017

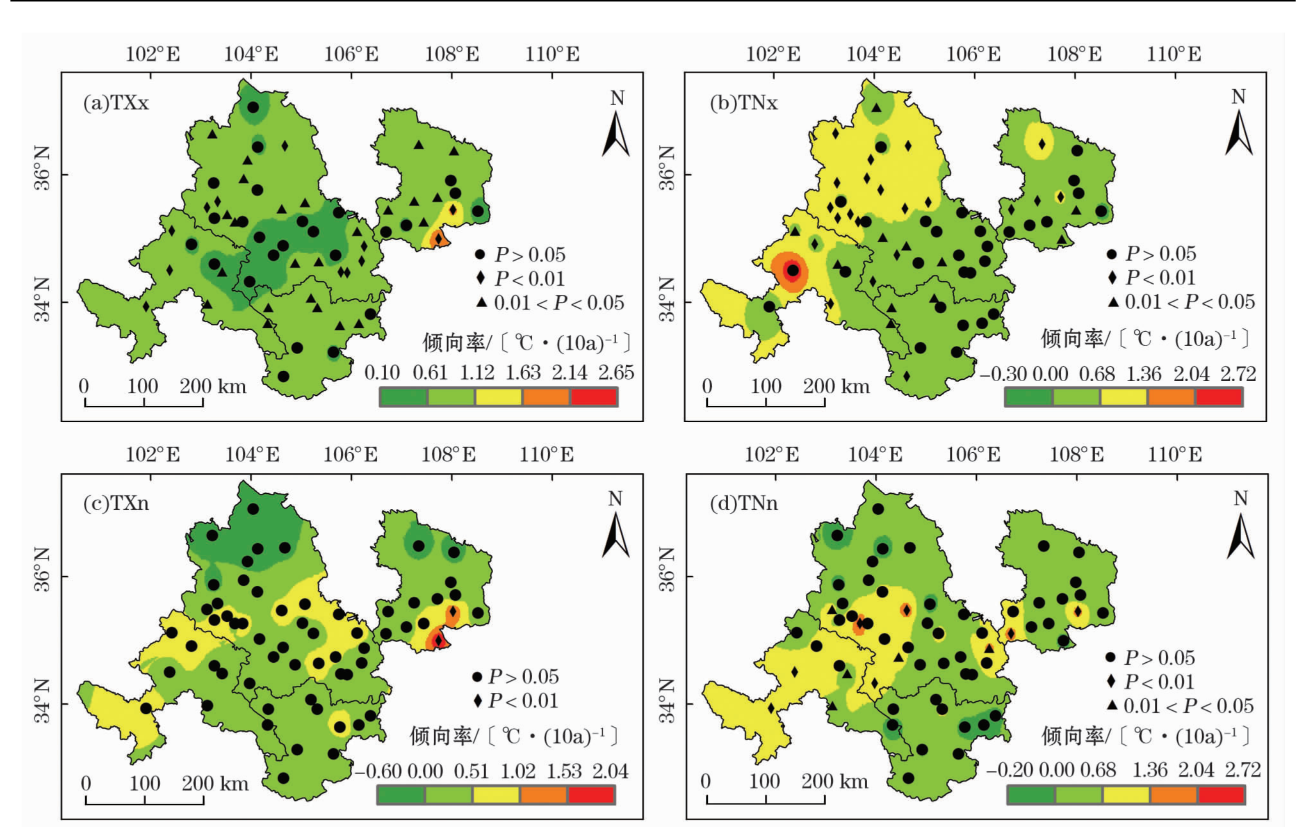


图 6 1988—2017 年河东地区极端气温极值指数趋势的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of extreme indices of extreme temperature events in the Hedong region from 1988 to 2017

了0.01的显著性检验,约27.87%(17个)的站点呈不明显的下降趋势。大部分站点TXn均呈增加趋势,只有灵台和宁县增加趋势显著,呈减少趋势的站点主要分布在北部地区,但趋势不显著。

2.2.4 其他指数 由图7得知,TXam和TNam均呈一致的增加趋势,TXam的增幅大于TNam。所有站点的TXam变化显著,其中灵台增幅最大〔2.19 ℃·(10a)⁻¹〕,且通过0.01的显著性检验。安定的TNam增幅最大〔0.88 ℃·(10a)⁻¹〕,且通过0.01的显著性检验,约13.11%(8个)的站点TNam的增加趋势不显著,主要分布在中西部和东部地区。DTR有大约19.67%(12个)的站点呈减少趋势,增加趋势的站点中有约36.73%(18个)的站点增加趋势显著。除舟曲站外,其余各站GSL均呈增加趋势,且大约75%(45个)的站点增加趋势显著,灵台增幅最大〔15.51 d·(10a)⁻¹〕,且通过0.01的显著性检验。约32.79%(20个)的站点的CSDI增加趋势不显著,西峰减幅最大〔−1.40 d·(10a)⁻¹〕,其余均呈不显著的减少趋势。所有站点的WSDI均呈一致的增加趋势,仅14.75%(9个)的站点增加趋势显著,其中灵台、宁县、舟曲的增幅较大,均超过4 d·(10a)⁻¹。

2.3 区域差异

为更透彻地了解河东地区极端气温空间变化,根据地貌特征将其分为4大区域:甘南高原、陇西高原、陇东高原、陇南山地。

从表4中可看出,4个区域都呈现出变暖趋势,这与整个研究区的结果一致。FD0、ID0、TX10P在陇东高原地区降幅最大,CSDI在陇南山地降幅最大,TN10P在甘南高原地区降幅最大。SU25、TXx、TXam、GSL、WSDI在陇东高原地区升幅最大,TR20和TX90P在陇南山地升幅最大,TN90P、TNx在陇西高原地区升幅最大,TNam在甘南高原地区升幅最大。暖指数升幅顺序为:陇东高原 > 陇西高原 > 陇南山地 > 甘南高原,冷指数降幅顺序为:陇东高原 > 甘南高原 > 陇西高原 > 陇南山地。相比之下陇东高原地区气温变暖最明显,这与赵一飞等[23]的研究结果一致,而甘南高原地区气温变化幅度最小,这与马中华等[32]的研究结果一致,故相比之下甘南高原地区气候变暖不明显。

2.4 极端气温指数变化趋势与经纬度、海拔高度的关系

根据各极端气温指数变化趋势与地理位置的相

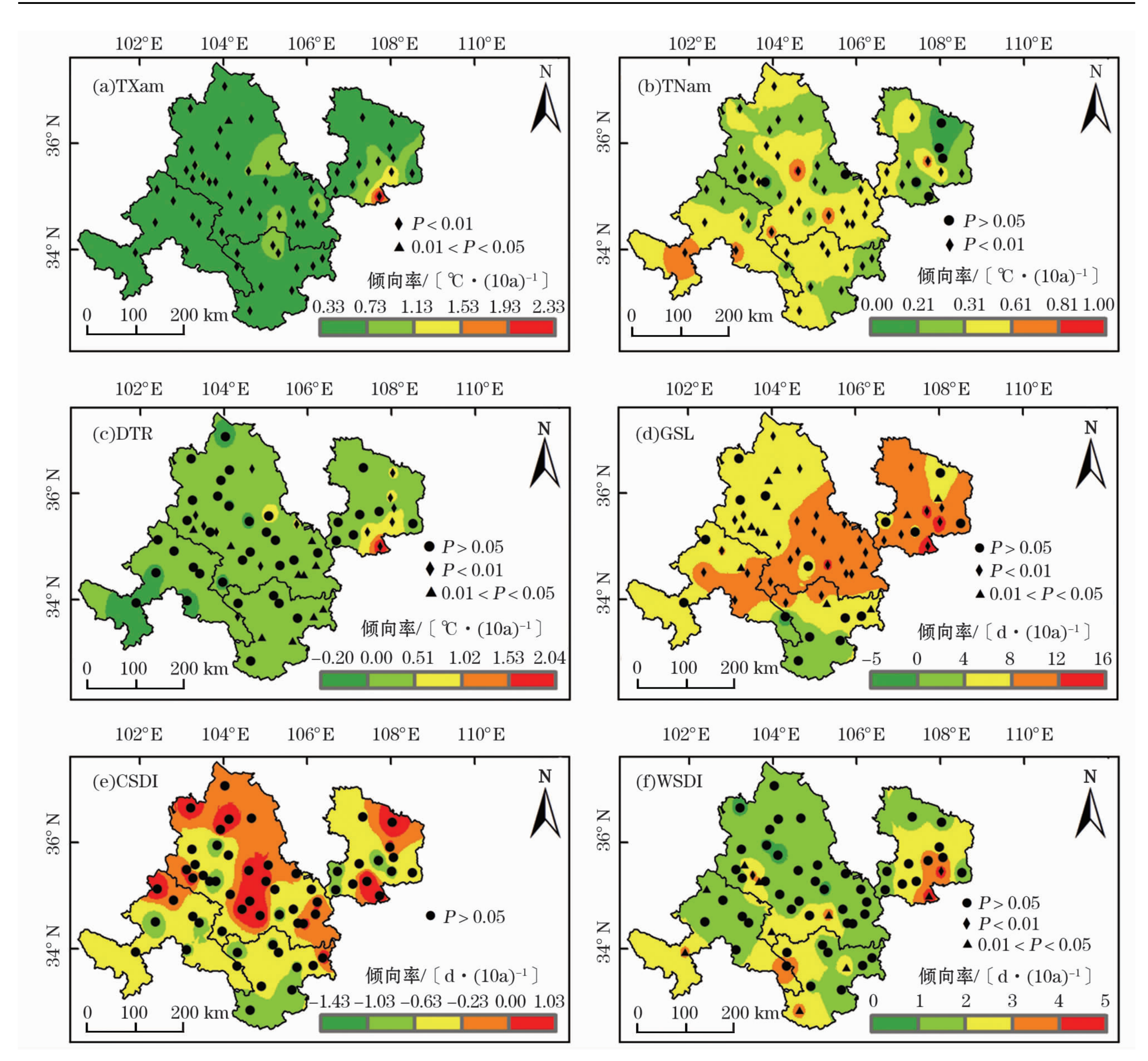


图 7 1988—2017 年河东地区极端气温其他指数趋势的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution in other indices of extreme temperature events in the Hedong region from 1988 to 2017

关性分析来看(表 5),除 TXn 和 CSDI 外,其余极端气温指数与纬度关系不显著,TXn 与纬度呈显著负相关,CSDI 与纬度呈显著正相关,即随着纬度增大 TXn 变化幅度减小,CSDI 变化幅度增大。河东地区地势大致由西北向东南降低,TR20、TX90P、TX10P、TN10P、TXam、DTR 与站点海拔呈显著负相关,与经度呈显著正相关,表明海拔越低越靠近河东地区东部,极端气温指数值变化越大。TNx 与站点海拔呈显著正相关,与经度呈显著负相关,表明海拔越高越靠近河东地区西部,指数变化越大。此外,SU25 与站点海拔呈显著负相关,TNn 与站点海拔呈显著正相关,即随着海拔高度的增大 SU25 升幅减小,TNn 变化幅度增大。从极端气温指数与地理位置相关参数变化的相关性分析中进一步表明了陇东高原地区气候变暖更明显,甘南高原地区气候变暖不明显。

2.5 极端气温指数与河东地区区域气候变化的相关分析

为进一步了解河东地区极端气温指数与区域性增暖的关系,本研究将极端气温指数与平均气温进行了相关性分析(表 6)。除 TNn、TXn、CSDI 外,其余极端气温指数与平均气温显著相关,表明极端气温指数对气候变暖有很好的响应,极端气温变化可以很好地反映该区域的气候变化状况。

气候变暖也同样影响极端气温指数的变化,对平均气温进行突变检验,发现平均气温在 1995 年发生突变。以此为节点统计突变前后各极端气温指

表 4 1988—2017 年河东地区不同区域极端气温均值与变化趋势

Tab. 4 The averages and trends of extreme temperature events in the four sub-regions in the Hedong region from 1988 to 2017

极端气温指数	甘南高原		陇西高原		陇东高原		陇南山地	
	均值	变化趋势	均值	变化趋势	均值	变化趋势	均值	变化趋势
FD0	173.42	-5.00**	140.14	-5.58**	130.11	-6.05**	80.24	-4.22*
ID0	18.94	-3.05**	23.79	-2.51*	20.56	-4.03**	3.99	-0.65
SU25	28.21	4.03**	69.57	6.52**	89.43	7.10**	99.88	6.82**
TR20	3.40	0.77**	3.81	1.42**	7.32	2.41**	19.94	3.55*
TX90P	13.47	2.53**	16.05	3.58**	14.88	3.73**	16.15	3.83**
TN90P	10.29	2.85**	10.32	3.20**	10.33	3.17**	10.30	2.83**
TX10P	10.38	-1.89**	10.43	-2.08**	10.50	-2.69**	10.46	-2.55**
TN10P	10.34	-2.63**	10.32	-2.12**	10.40	-0.88	10.33	-2.31**
TXx	28.73	0.67**	32.59	0.68	34.40	0.83**	34.51	0.69*
TNx	15.75	0.52**	19.94	0.63**	21.75	0.41	22.93	0.34
TXn	-5.58	0.49	-6.44	0.32	-6.21	0.43	-0.67	0.38
TNn	-19.40	0.65*	-17.93	0.58	-17.55	0.52	-10.39	0.13
TXam	13.36	0.53**	15.14	0.62**	16.24	0.77**	18.07	0.63**
TNam	-0.28	0.46**	3.13	0.42**	4.58	0.34**	7.73	0.42**
DTR	13.64	0.08	12.00	0.20*	11.66	0.43**	10.33	0.21
GSL	213.56	6.20**	236.51	7.82**	243.78	9.45**	283.14	5.80*
CSDI	1.37	-0.37	2.02	-0.14*	2.20	-0.29	1.33	-0.58
WSDI	3.31	2.14**	3.56	1.68*	4.69	2.48*	4.18*	1.92*

注：*、** 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性检验水平。极端气温均值(d 或℃)，变化趋势[$d \cdot (10a)^{-1}$或$℃ \cdot (10a)^{-1}$]。

表 5 河东地区极端气温指数变化趋势与地理位置的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients between the linear trends of extreme temperature indices and the geographical parameters in the Hedong region

极端气温指数	纬度	经度	海拔	极端气温指数	纬度	经度	海拔
FD0	-0.03	-0.15	-0.07	TNx	0.24	-0.48**	0.38**
ID0	-0.11	-0.21	-0.20	TXn	-0.35**	0.13	-0.01
SU25	-0.03	0.18	-0.34**	TNn	0.00	-0.12	0.32*
TR20	-0.22	0.30*	-0.62**	TXam	-0.08	0.32*	-0.29*
TX90P	-0.05	0.28*	-0.46**	TNam	-0.17	-0.23	0.19
TN90P	-0.02	0.03	-0.05	DTR	0.04	0.39**	-0.34**
TX10P	0.24	0.37**	-0.29*	GSL	0.16	0.31*	0.00
TN10P	0.24	0.42**	-0.29*	CSDI	0.28*	0.03	0.01
TXx	0.07	0.11	-0.16	WSDI	-0.21	0.19	-0.19

注：*、** 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性检验水平。

表 6 河东地区平均气温与极端气温指数的相关系数

Tab. 6 Correlation coefficients between the annual mean temperature values and the extreme temperature indices in the Hedong region

极端气温指数	FD0	ID0	SU25	TR20	TX90P	TN90P	TX10P	TN10P
平均气温	-0.78**	-0.61**	0.79**	0.61**	0.88**	0.90**	-0.85**	-0.77**
极端气温指数	TXx	TNx	TXn	TNn	DTR	GSL	CSDI	WSDI
平均气温	0.67**	0.56**	0.30	0.33	0.64**	0.77**	-0.27	0.60**

注：*、** 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性检验水平。

表 7　气温突变前后的极端气温指数变化

Tab. 7　Variation of extreme air temperature indices before and after abrupt temperature change during 1988 – 1994 and 1995 – 2017

年份	FD0/d	ID0/d	SU25/d	TR20/d	TX90P/d	TN90P/d	TX10P/d	TN10P/d
1988—1994	139.32	23.62	61.84	4.21	5.34	6.41	14.01	12.70
1995—2017	131.81	18.33	76.23	7.72	12.01	11.52	9.36	9.61
突变影响	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓
年份	TXx/℃	TNx/℃	TXn/℃	TNn/℃	DTR/℃	GSL/d	CSDI/d	WSDI/d
1988—1994	31.41	19.41	-6.21	-18.01	11.44	233.62	2.11	0.50
1995—2017	33.21	20.51	-5.20	-16.62	12.03	244.53	1.81	4.93
突变影响	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑

数的均值(表 7),发现平均气温发生突变后 SU25、TR20、TX90P、TN90P、TXx、TNx、TXn、TNn、DTR、GSL、WSDI 表现为增加,FD0、ID0、TX10P、TN10P、CSDI 表现为减少。可见,在全球变暖背景下,河东地区变暖趋势明显。

3　结论和讨论

3.1　结论

(1) 近 30 a 河东地区呈变暖趋势,极端气温冷指数除 TNn 和 TXn 外都明显减少,极端气温暖指数明显增加。近 10 a 极端气温指数变化幅度最大。暖指数与冷指数的变化幅度,昼指数与夜指数的变化幅度表现出明显的非对称性:暖指数的变暖幅度大于冷指数;昼指数的变暖幅度大于夜指数。

(2) 在时间转折上,有 13 个极端气温指数发生突变,多数极端气温指数的突变年份发生在 20 世纪 90 年代中后期和 21 世纪初期。

(3) 趋势的空间分布上,极端气温指数在河东地区基本上呈一致的升高(下降)趋势。极端暖指数上升幅度和极端冷指数下降幅度在陇东高原最大,陇东高原地区变暖幅度最大,甘南高原地区变暖幅度最小。

(4) 大部分极端气温指数与经度和海拔高度有显著的相关性,不同指数与地理位置的相关系数有差异。河东地区极端气温指数的变化与区域性增暖有密切联系,气候变暖突变前后极端气温指数有明显差异,SU25、TR20、TX90P、TN90P、TXx、TNx、TXn、TNn、DTR、GSL、WSDI 表现为增加,FD0、ID0、TX10P、TN10P、CSDI 表现为减少,表明极端气温指数对气候变暖有较好的响应。

3.2　讨论

随着极端气候事件的频发,越来越多的学者将注意力转向对极端气候事件形成原因的探究。本研究得出极端气温指数与经度和海拔高度有显著的相关性,这与高文华等[26]的研究结果一致,高文华等通过极端气温指数与经度和海拔的相关性得出地形对极端气温指数变化的影响:极端气温指数变暖幅度平原站最高,其次是山间盆地站,最后是山地丘陵区。Li 等[33]的研究也表明,平原站极端气温指数的变暖幅度最大,依次为山间盆地站、山谷站和山峰站。而河东地区地形复杂,地形对河东地区极端气温指数的影响还需进一步探究。此外有研究表明,热岛效应[34]、大尺度大气环流[35]、地表覆盖[36]、人类温室气体的排放[37]以及云量[38]的变化都会对极端气温事件产生影响,可见,极端气温事件的形成机制非常复杂,其形成原因还需深入研究。

极端气温事件的变化会对河东地区农业生产活动有一定的影响,气候变暖可以使作物生长期延长,以提高产量[39]。但是温度升高,有些喜低温农作物的生长会受到影响,从而导致产量下降,也会使病虫害数量增多,范围扩大,加剧病虫害对农业生产的影响[40]。高温事件增多会加剧土壤水分的无效蒸发,加快农田盐渍化和土壤有机质的微生物分解,造成土地肥力下降[41]。气候变暖对农业生产的影响利弊兼有,因此必须加强研究,充分利用其积极因素,控制减少其消极因素,以及掌握、遵循和充分利用气候变化的规律,提高人们对气候变化的应对能力,使河东地区农业得到持续稳定的发展。

参考文献(References):

〔1〕 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点〔J〕. 冰川冻土,2013,35(5):1 068 – 1 076.〔Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1 068 – 1 076.〕

〔2〕 Ding Yihui, Ren Guoyu, Zhao Zongci, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress〔J〕. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(6): 954 – 971.

〔3〕 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析〔J〕. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 791 – 798. 〔Tang Guoli, Ren Guoyu. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China〔J〕. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 791 – 798.〕

〔4〕 Jonsson A M, Linderson M L, Stjernquist I, et al. Climate change and the effect of temperature backlashes causing frost damage in *Picea abies*〔J〕. Global and Planetary Change, 2004, 44(1 – 4): 195 – 207.

〔5〕 Garcia-Herrera R, Díaz J, Trigo R M, et al. Extreme summer temperatures in Iberia: Health impacts and associated synoptic conditions〔J〕. Annales Geophysicae, 2005, 23(2): 239 – 251.

〔6〕 Beniston M. Warm winter spells in the Swiss Alps: Strong heat waves in a cold season? A study focusing on climate observations at the Saentis high mountain site〔J〕. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L01812, doi: 10.1029/2004GL021478.

〔7〕 Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation〔J〕. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.

〔8〕 Rahimzadeh F, Asgari A, Fattahi E. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades〔J〕. International Journal of Climatology, 2009, 29(3): 329 – 343.

〔9〕 Supari, Tangang F, Juneng L, et al. Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia〔J〕. International Journal of Climatology, 2017, 37(4): 1 979 – 1 997.

〔10〕 Caesar J, Alexander L V, Trewin B, et al. Changes in temperature and precipitation extremes over the Indo-Pacific region from 1971 to 2005〔J〕. International Journal of Climatology, 2011, 31(6): 791 – 801.

〔11〕 Guan Y, Zhang X, Zheng F, et al. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960 – 2012 in the Yangtze River Basin, China〔J〕. Global and Planetary Change, 2015, 124: 79 – 94.

〔12〕 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析〔J〕. 地理学报, 2013, 68(5): 611 – 625. 〔Wang Qiong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962 – 2011〔J〕. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611 – 625.〕

〔13〕 Yu Zhen, Li Xilin. Recent trends in daily temperature extremes over Northeastern China (1960 – 2011)〔J〕. Quaternary International, 2015, 380 – 381: 35 – 48.

〔14〕 Chen Y, Deng H, Li B, et al. Abrupt change of temperature and precipitation extremes in the arid region of Northwest China〔J〕. Quaternary International, 2014, 336: 35 – 43.

〔15〕 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50 a 气温和降水极端事件的变化特征〔J〕. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1 720 – 1 733. 〔Wang Baolong, Zhang Mingjun, Wei Junlin, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over Northwest China in recent 50 years〔J〕. Journal of Natural Resources, 2012, 27(10): 1 720 – 1 733.〕

〔16〕 丁之勇, 董义阳, 鲁瑞洁. 1960—2015 年中国天山南、北坡与山区极端气温时空变化特征〔J〕. 地理科学, 2018, 38(8): 1 379 – 1 390. 〔Ding Zhiyong, Dong Yiyang, Lu Ruijie. Spatio-temporal variability of temperature extremes in Tianshan Mountains area, Northwest China, during 1960 – 2015〔J〕. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(8): 1 379 – 1 390.〕

〔17〕 Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Change in extreme temperature event frequency over mainland China during 1961 – 2008〔J〕. Climate Research, 2011, 50: 125 – 139.

〔18〕 任福民, 翟盘茂. 1951—1990 年中国极端气温变化分析〔J〕. 大气科学, 1998, 22(2): 217 – 227. 〔Ren Fumin, Zhai Panmao. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951 – 1990〔J〕. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(2): 217 – 227.〕

〔19〕 Zhai P M, Sun A J, Ren Fumin, et al. Changes of climate extremes in China〔J〕. Climatic Change, 1999, 42: 203 – 218.

〔20〕 齐月, 陈海燕, 房世波, 等. 1961—2010 年西北地区极端气候事件变化特征〔J〕. 干旱气象, 2015, 33(6): 963 – 969. 〔Qi Yue, Chen Haiyan, Fang Shibo, et al. Variation characteristics of extreme climate events in Northwest China during 1961 – 2010〔J〕. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(6): 963 – 969.〕

〔21〕 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 1960—2009 年甘肃省极端气温的变化〔J〕. 干旱区研究, 2012, 29(4): 674 – 680. 〔Wang Baolong, Zhang Mingjun, Wei Junlin, et al. Study on change of extreme temperatures in Gansu Province during the period of 1960 – 2009〔J〕. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 674 – 680.〕

〔22〕 窦睿音, 延军平, 王鹏涛. 全球变化背景下甘肃近半个世纪气温时空变化特征〔J〕. 干旱区研究, 2015, 32(1): 73 – 79. 〔Dou Ruiyin, Yan Junping, Wang Pengtao. Spatiotemporal distribution of temperature in Gansu Province under global climate change during the period from 1956 to 2012〔J〕. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 73 – 79.〕

〔23〕 赵一飞, 张勃, 汪宝龙, 等. 近 54 a 来甘肃省河东地区气候时空变化特征〔J〕. 干旱区研究, 2012, 29(6): 956 – 964. 〔Zhao Yifei, Zhang Bo, Wang Baolong, et al. Spatiotemporal climate change in the Hedong region in Gansu Province in recent 54 years〔J〕. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 956 – 964.〕

〔24〕 赵一飞. 近 50 年来甘肃河东地区农业气候资源变化及其对农牧业的影响〔D〕. 兰州: 西北师范大学, 2013. 〔Zhao Yifei. Changes of Agricultural Climate Resources in Hedong Region of Gansu and Its Impacts on Local Agriculture and Animal Husbandry in the Last 50 Years〔D〕. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013.〕

〔25〕 尹海霞, 张勃, 张建香, 等. 甘肃省河东地区春玉米气候因子及气候生产潜力时空变化〔J〕. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1 504 – 1 510. 〔Yin Haixia, Zhang Bo, Zhang Jianxiang, et al. Spatio-temporal variation patterns of climatic factors and climatic potential productivity of spring maize in Eastern Gansu of Northwest China〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(6): 1 504 – 1 510.〕

〔26〕 高文华, 李开峰, 崔豫. 1960—2014 年河南极端气温事件时空演变分析〔J〕. 地理科学, 2017, 37(8): 1 259 – 1 269. 〔Gao Wenhua, Li Kaifeng, Cui Yu. Temporal and spatial variation of extreme temperature events in Henan Province during 1960 – 2014〔J〕. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(8): 1 259 – 1 269.〕

〔27〕 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异研究〔J〕. 自然资源学报, 2017, 32(5): 814 – 828. 〔Jia Yanqing, Zhang Bo, Zhang Yaozong, et al. Effect of urbanization on spatial and temporal variation of extreme temperature events

in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(5):814 –828.]

[28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:43 –47. [Wei Fengying. Diagnose and Forecast Technology of Modern Climate Statistics[M]. Beijing: China Meteorological Press,1999:43 –47.]

[29] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245 –259.

[30] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin,1975:202.

[31] Ma Chong, Pan Sunli, Wang Guoqing, et al. Changes in precipitation and temperature in Xiangjiang River Basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology,2016,123(3 –4):859 –871.

[32] 马中华,张勃,张建香,等. 近 30 a 甘肃省气温时空变异分析[J]. 高原气象,2012,31(3):760 – 767. [Ma Zhonghua, Zhang Bo, Zhang Jianxiang, et al. Analyses on spatial-temporal differentiation of air temperature in Gansu Province during 1979 –2008[J]. Plateau Meteorology,2012,31(3):760 –767.]

[33] Li Z, He Y, Theakstone W H, et al. Altitude dependency of trends of daily climate extremes in Southwestern China, 1961 –2008[J]. Journal of Geographical Sciences,2012,22(3):416 –430.

[34] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R, et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(10):1 301 –1 330.

[35] Gao M, Franzke C L E. Quantile regression-based spatiotemporal analysis of extreme temp erature change in China[J]. Journal of Climate,2017,30(24):9 897 –9 914.

[36] Wu L Y, Zhang J Y, Dong W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China[J]. Chinese Science Bulletin,2011,56(9):900 –905.

[37] Zhao M, Pitman A J. The impact of land cover change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convective precipitation[J]. Geophysical Research Letters,2002,29(6):1078, doi:10. 1029/2001GL013476.

[38] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961 –2005[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D07101, doi: 10. 1029/2007JD009389.

[39] 张雪琪,满苏尔·沙比提,马国飞. 叶尔羌河平原绿洲气候变化对粮食生产的影响[J]. 干旱区研究,2018,35(3):705 – 712. [Zhang Xueqi, Mansur Shabiti, Ma Guofei. Effects of climate change on grain production in plain oasis in the Yarkant River Basin[J]. Arid Zone Research,2018,35(3):705 –712.]

[40] 张强,邓振镛,赵映东,等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. 生态学报,2008,28(3):1 210 – 1 218. [Zhang Qiang, Deng Zhenyong, Zhao Yingdong, et al. The impacts of global climatic change on the agriculture in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(3):1 210 –1 218.]

[41] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1 008 – 1 017. [Zhang Weili, Wu Shuxia, Ji Hongjie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. Scientia Agricultura Sinica,2004,37(7):1 008 –1 017.]

Spatiotemporal Change of Extreme Temperature in the Hedong Region in Recent 30 Years

JIAO Wen-hui[1], ZHANG Bo[1], HUANG Tao[2], MA Shang-qian[1], HOU Qi[1]

(1. *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;
2. *Northwest Regional Climate Center, Lanzhou* 730020, *Gansu, China*)

Abstract: The methods of linear regression, Mann-Kendal test, sliding T-test and correlation analysis were used to analyze the spatiotemporal variation of extreme temperature events in the Hedong region based on the daily temperature (maximum, minimum and average) data from 61 meteorological stations in the study area during the period of 1988 –2017. The results showed that: ① In recent 30 years, the daily maximum and minimum temperature values, annual mean maximum and minimum temperature values, summer duration, tropical nights, warm days, warm nights, daily temperature range, warm-day duration and growing season were in an increase trend. Whereas the frost days, ice days, cold days, cold nights and cold-day duration were in a decrease trend; ② The change ranges of warming indices were obviously higher than those of cold ones. The warming ranges of diurnal indices were higher than those of nocturnal ones. The warming range was the highest in the Loess Plateau in east Gansu Province but the lowest in the Gannan Plateau; ③ Abrupt change of the most temperature indices occurred in the mid –1990s and early 21st century; ④ Most extreme temperature indices were closely related to the longitude and altitude. The variation of extreme temperature indices in the Hedong region was closely related to the regional warming.

Key words: extreme temperature; cold (warm) index; spatiotemporal variation; Hedong region; Gansu Province